

ОД СУНЧЕВОГ СИСТЕМА ДО ГРАНИЦА ВАСИОНЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

LECTURE SERIES

Book III

FROM THE SOLAR SYSTEM TO THE FRONTIERS OF THE UNIVERSE

Accepted at the 9th meeting of the Department of Mathematics,
Physics and Geo-Sciences on December 23rd, 2016

Editor

Academician
ZORAN KNEŽEVIĆ

BELGRADE 2017

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЦИКЛУС ПРЕДАВАЊА

Књига III

ОД СУНЧЕВОГ СИСТЕМА ДО ГРАНИЦА ВАСИОНЕ

Примљено на IX скупу Одељења за математику,
физику и гео-науке од 23. децембра 2016. године

Уредник

академик

ЗОРАН КНЕЖЕВИЋ

БЕОГРАД 2017

Издаје
Српска академија наука и уметности
Кнеза Михаила 35, Београд

Технички уредник
Мира Зебић

Лектор и коректор
Снежана Крсинић-Букарица

Тираж
400

Штампа
Службени гласник

САДРЖАЈ CONTENTS

Предговор – Зоран Кнежевић

Бојан Новаковић, *У нашем суседству: мала тела Сунчевог система* 1
Bojan Novaković, *In our neighborhood: small solar system bodies* 14

Слободан Јанков, *Висока просторна резолуција: нови прозор
за сагледавање тајни васионе* 15
Slobodan Jankov, *High spatial resolution: new window to view
the secrets of the Universe* 23

Оливера Латковић, *Шта се крије у светлости звезда?* 25
Olivera Latković, *What is hiding in the starlight?* 39

Дејан Урошевић, *Остаци супернових: најмоћнији акцелератори
у Галаксији* 41
Dejan Urošević, *Supernova remnants: the most powerful accelerators
in the Galaxy* 53

Лука Ч. Поповић, *Најсјајнији објекти у васиони: активна
галактичка језгра и гама бљескови* 55
Luka Č. Popović, *The brightest objects in the Universe: active
galactic nuclei and gamma ray bursts* 65

Милан М. Ћирковић, *Симпсон, Кардашев и пола века еволуционог
промишљања астробиологије и SETI пројеката* 67
Milan M. Ćirković, *Simpson, Kardashev and half a century
of the evolutionary deliberation of astrobiology and SETI projects* 75

ПРЕДГОВОР

У склопу обележавања 175. годишњице свог континуитета, Српска академија наука и уметности је почев од 2016. године покренула неколико нових облика активности, с циљем успостављања боље комуникације с јавношћу и приближавања рада Академије и њених чланова широкој публици. Покретањем серије циклусних пројеката, од којих се сваки састоји од више предавања наших еминентних научника посвећених истраживањима у некој области науке присутној у Академији, жеља је била да се ове области представе кроз сагледавање њиховог садашњег стања и праваца будућег развоја у свету, али и са аспекта положаја и улоге наше науке у савременим научним токовима. Пројекте осмишљавају и припремају чланови Академије, а предавања се одржавају у њеним просторијама.

Припала ми је част да организујем други по реду циклусни пројекат у овој серији, „Од Сунчевог система до граница васионе”, посвећен астрономији. Идеја са којом сам ушао у овај захтевни подухват била је да се што целовитије и приступачније, али и без претераног поједностављивања, представе савремена астрономска истраживања у свету и код нас, да се сложени феномени физичког света који нас окружује и чији смо само мајушни део на разумљив начин представе радозналом посетиоцу. Пошли смо, стога, на пут од непосредног нам космичког суседства и стигли до најудаљенијих кутака васионе, чули смо одговор савремене науке на питања о томе како је настала наша планета Земља, а како васиона у целини, шта су звезде, далеке галаксије и други тајновити васионски становници, какви процеси се на њима одвијају, најзад, да ли смо сами у свемиру? На крају тог пута стоји овај зборник који са великим задовољством предајемо читаоцу.

Циклусни пројекат не било могуће организовати без драгоцене сарадње мојих колега са Астрономске опсерваторије у Београду и Катедре за астрономију Математичког факултета Универзитета у Београду, чија предавања у оквиру пројекта сте могли да чујете и чије прегледне радове можете да

VIII

прочитате на страницама овог зборника. На томе им се Српска академија наука и уметности и ја најтоплије захваљујемо.

Београд, 23. фебруара 2017. године

Зоран Кнежевић

БОЈАН НОВАКОВИЋ*

У НАШЕМ СУСЕДСТВУ: МАЛА ТЕЛА СУНЧЕВОГ СИСТЕМА

А п с т р а к т. – Сунчев систем није одувек био овакав какав је данас. Од када је настао пре око 4,6 милијарди година непрестано је пролазио кроз различите фазе и видове еволуције. Један посебно занимљив аспект еволуције нашег планетарног система свакако представља миграција џиновских планета, која се одиграла током две временски одвојене фазе. Овде су приказана два модела која описују поменуте фазе миграције, као и улога малих тела Сунчевог система у тестирању тих модела.

УВОД

Наш планетарни систем дом је осам планета, великог броја њихових природних сателита и још већег броја малих тела, како астероида тако и комета. Од тренутка када је настао, пре око 4,6 милијарди година, Сунчев систем се непрестано мења пролазећи кроз различите фазе еволуције. Једно од места где остају „записани“ трагови еволуције Сунчевог система свакако је астероидни појас. То је прстен који се простира између орбита Марса и Јупитера и у коме се налази највећи број астероида.

Астероиди су небеска тела у Сунчевом систему за која се верује да су се најмање изменила од настанка до данас. Међутим, и ови објекти подложни су неким видовима еволуције, и то пре свега динамичкој и сударној еволуцији. У том смислу посебно су занимљиве тзв. *сударне фамилије астероида* које

* Катедра за астрономију, Математички факултет, Универзитет у Београду,
e-mail: bojan@matf.bg.ac.rs.

представљају групе астероида на међусобно веома сличним орбитама, а за које се верује да су настале распадом једног већег астероида (Zappala et al. 1990; Milani et al. 2014). Проучавање фамилија астероида може нам открити много тога како о динамичкој тако и о сударној еволуцији самог појаса астероида (види нпр. Spoto et al. 2015; Novaković et al. 2015).

Проучавање астероида веома је значајно и са једног другог аспекта. Наиме, често се каже да сваки модел еволуције Сунчевог система мора бити „верификован“ у астероидном појасу. Другим речима, свака таква теорија мора бити у сагласности са оним што о том појасу знамо. У овом излагању посебно ћемо се осврнути на рану фазу динамичке еволуције нашег планетарног система коју описују два модела, модел велике промене правца (енг. *Grand Tack Model*) и Ница модел (енг. *Nice Model*), као и на неке карактеристике прстена астероида релевантне за потврђивање ова два модела.

РАНА ДИНАМИЧКА ЕВОЛУЦИЈА СУНЧЕВОГ СИСТЕМА

Општи поглед на рану хронологију Сунчевог система значајно је еволуирао у последње време, када су како посматрачки подаци тако и теоријски модели, указали на потенцијално кључну улогу миграције планета (Armitage 2007; Kley and Nelson 2012). Модели еволуције Сунчевог система очигледно сада морају узети у обзир могућност да су планете значајно мигрирале пре него што су доспеле на своје данашње орбите. У раној фази еволуције разликујемо две кључне епохе обликовања планетарног система, које се повезују са два потпуно различита механизма миграције спољашњих планета, тј. планета тзв. Јупитеровог типа. Први од њих узрокован је интеракцијом планета са протопланетарним диском гаса и прашине, док други настаје услед гравитационе интеракције планета са планетезималима и другим планетама. Наше тренутно разумевање сугерише да су планете Сунчевог система доживеле оба типа миграције, који се јављају као последица два поменута механизма, при чему су се ове две миграције догодиле у временски потпуно одвојеним периодима.

Период од интереса за разумевање велике радијалне редистрибуције материјала у Сунчевом систему протеже се од тренутка кондензације првих чврстих честица пре 4.568 милијарди година (Amelin et al. 2002; Bouvier and Wadhwa 2010), па све до касног бомбардовања Месеца, које се догодило пре око 4,1–3,9 милијарди година (Chapman et al. 2007; Bottke et al. 2012). У том смислу интересантно је поменути да је гасни протопланетарни диск постојао само у првих 4–5 милиона година формирања Сунчевог система (Kita et al. 2005). Претпоставља се да су у том периоду спољашње џиновске планете већ достигле своју садашње величине, док су у унутрашњем делу Сунчевог система стеновити планетезимали формирали ембрионе планета величине између Месеца и Марса (Weidenschilling et al. 1997; Kokubo and Ida 2000). Тек у наредних 30–100 милиона година завршена је акреција унутрашњих планета Земљиног типа (Kleine et al. 2009; Morbidelli et al. 2012), док је неких

400–600 милиона година касније дошло до динамичке нестабилности спољашњих планета, која је довела до реконфигурације спољашњег дела Сунчевог система и интензивног бомбардовања тела у унутрашњем делу система (“Nice Model”; Gomes et al. 2005; Morbidelli et al. 2005; Tsiganis et al. 2005; Levison et al. 2011; Bottke et al. 2012).

Поменути догађаји довели су до формирања необичног планетарног система у којем је мањим планетама, уједно и ближим Сунцу, требало много више времена да се формирају него много масивнијим спољашњим планетама. Цео наш Сунчев систем, скоро све од планета па до километарских астероида, доспео је у своју тренутну конфигурацију тек 400–600 милиона година након формирања првих чврстих планетезимала. Занимљиво је да неке од поменутих особина Сунчев систем дели са вансоларним планетарним системима откривеним последњих година, од којих многе карактерише како миграција планета тако и знакови расејања орбита, највероватније насталих као последица блиских прилаза између планета (Armitage 2007; Juric and Tremaine 2008; Raymond et al. 2010).

Све поменуто довело је и до промене начина на који анализирамо и интерпретирамо физичке карактеристике тела из различитих делова Сунчевог система. Кључна порука је да објекти у Сунчевом систему нису нужно настали на местима где их данас налазимо.

МОДЕЛ ВЕЛИКЕ ПРОМЕНЕ ПРАВЦА

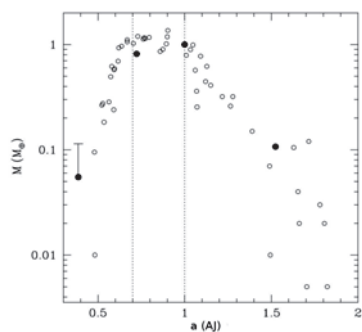
Модели настанка унутрашњих (земљоликих) планета углавном имају за циљ да реконструишу еволуцију планетезимала при којој од великог броја тела астероидних величина настаје неколико планета. Тај процес се одвија кроз неколико одвојених фаза у којима се тела сударају и акрецијом повећавају своју масу. У том смислу, мале релативне брзине између планетезимала, које су последица динамички *хладних* орбита (тј. чињеница да су путање малог ексцентрицитета и нагиба путањске равни), фаворизован је раст већих објеката јер су сфере њихових гравитационих утицаја веће (Ida and Makino 1993; Rafikov 2003). Ова фаза догађа се на временској скали од 10^5 година, и обично се назива *неконтролисани распад* (енг. *runaway growth*). Током те фазе долази до брзог формирања објеката до величине Месеца, зависно од густине материјала у конкретном делу диска. Једном када највећи објекти достигну ту величину, они постају довољно масивни да гравитационо утичу на кретање других оближњих тела, што доводи до повећања ексцентрицитета путања мањих објеката, што за последицу има повећање њихових релативних брзина.

Након тога ти већи објекти (протопланете) улазе у фазу тзв. олигархијског раста (енг. *oligarchic growth*), у којој се њихов раст успорава због већих релативних брзина које истовремено лимитирају ефикасност процеса акреције, али и смањују саму вероватноћу судара. Све то омогућава мањим протопланетама да нарасту нешто брже од оних највећих, што доводи до

уједначавања маса свих протопланета (Kokubo and Ida 1998, 2000). С друге стране, мали планетезимали никада неће значајније нарасти јер њихова маса није довољна да би се процес акреције наставио и при нешто већим релативним брзинама. Као резултат свега тога, на крају периода олигархијског раста формира се бимодална популација коју чини мали број протопланета и велики број малих планетезимала (Kenyon and Bromley 2006).

Поменута бимодална расподела се обично моделира претпостављајући да је укупна маса протопланета приближно једнака укупној маси малих објеката, и као таква, ова расподела је полазна тачка у многим модерним моделима настанка унутрашњих планета, као што је то случај и у моделу велике промене правца (Morbidelli et al. 2012). Током завршне фазе формирања унутрашњих планета планетарни ембриони се спајају у стабилни систем планета. Та фаза, позната и под именом *џиновски удар* (енг. *giant impact*), догодила се негде између 30 и 100 милиона година након почетка формирања Сунчевог система.

Описани модели успешно репродукују настанак 3–4 земљолике планете на орбитама сличним онима које имају унутрашње планете у нашем систему (O'Brien et al. 2006; Raymond et al. 2009; Morishima et al. 2008, 2010). Међутим, сви ти модели типично имају проблем да репродукују малу масу Марса у односу на масу Земље (Raymond et al. 2009). Наиме, у поменутим традиционалним моделима, тзв. проблем „малог Марса“ јавља се као последица чињенице да се формирање планете Марс симулира акрецијом велике количине материјала за коју се претпоставља да је била доступна на тој удаљености од Сунца, тачније између орбите Земље и унутрашњег руба астероидног прстена. Као могуће решење овог проблема Хансен (Hansen 2009) је предложио промену најчешће коришћених почетних услова, указујући на то да ако се диск у коме се налази материјал за формирање планета ограничи на интервал између 0,7 и 1,0 астрономских јединица (АЈ), модели успешно репродукују како масе и орбите унутрашњих планета, тако и однос маса Земље и Марса (слика 1). Оно што је међутим био проблем са овим предлогом, јесте механизам који би одсекао спољашњу границу диска на 1,0 АЈ. Такође, ако се диск завршавао на тој удаљености од Сунца, како онда објаснити настанак астероидног прстена између 2,0 и 3,5 АЈ.



Слика 1. Испуњени кружићи представљају положаје унутрашњих планета Сунчевог система, док су празним кружићима представљени резултати симулације (преузето из Hansen 2009)

Значајна разлика у временским скалама за формирање циновских спољашњих планета (око 5 милиона година) и планете Земље (неколико десетина милиона година) омогућава значајну интеракцију између већ нараслих спољашњих и претеча унутрашњих планета. Модел велике промене правца представља сценарио по коме су скоро потпуно нарасле спољашње планете накратко мигрирале у унутрашњост Сунчевог система током фазе у којој је протопланетарни диск још увек био богат гасом, и том приликом значајно измениле расподелу како планетезимала тако и планетарних ембриона у тој области.

Докази о миграцији циновских вансоларних планета добијени су на основу података о њиховој орбиталној расподели, као и на основу бројних хидродинамичких симулација интеракције тог типа планета са гасним диском (Kley and Nelson, 2012). У нашем Сунчевом систему такође постоје индикатори који указују да је дошло до миграције циновских спољашњих планета. На тако нешто указује орбита патуљасте планете Плутон (Malhotra 1995), затим саме орбите спољашњих планета (Tsiganis et al. 2005, Morbidelli et al. 2009), као и структура прстена астероида у околини Кирквудових празнина (Minton and Malhotra 2009).

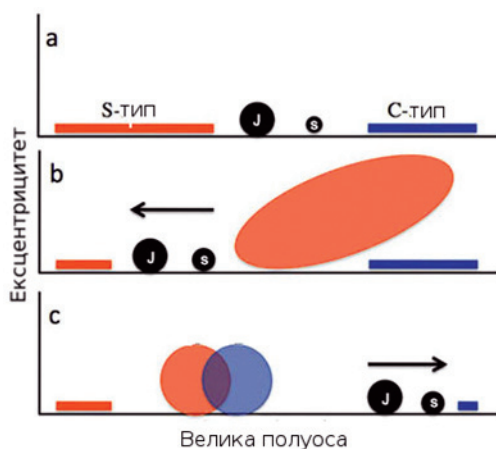
Нумеричке симулације у последњих 20 година су поуздано показале да планете Јупитерове масе у гасном протопланетарном диску формирају прстенасте празнине и мигрирају према унутра. Овај тип миграције познат је као тип II (Lin and Papaloizou 1986; Kley and Nelson 2012). Међутим, ова еволуција је другачија за планете које се налазе у међусобној резонанци у средњем кретању. Као што је добро познато, више симулација је показало да Сатурн бива ухваћен у 2:3 резонанцу са Јупитером (Masset and Snellgrove 2001; Crida and Morbidelli 2007; Pierens and Raymond 2011). Ова резонантна конфигурација доводи до промене угаоног момента планета који потиче од гасног диска, што доводи до промене смера миграције код обе планета, које почињу да мигрирају ка споља. Овде међутим треба поменути да промена смера миграције Јупитера и Сатурна у поменутим симулацијама зависи од маса планета, и јавља се само ако је Јупитер веће масе од Сатурна. Оваква еволуција се наставља ако су планете у резонанци све до дисипације гаса у диску.

Могућа миграција Јупитера у унутрашњост Сунчевог система, пре него је заустављен и преусмерен резонанцом са Сатурном, имала би драматичан ефекат на формирање унутрашњих планета. Због још увек великих непознаница како о настанку циновских планета, тако и о еволуцији гасног диска, није могуће прецизно одредити временске скале и тренутке када је дошло до промена смера миграције Јупитера и Сатурна. Оно што се може урадити јесте потрага за траговима које би једна таква миграција дефинитивно морала оставити на унутрашњим планетама и астероидном прстену, и на основу тога покушати направити модел који објашњава поменуте догађаје и трагове.

Као што је већ поменуто, Хансен (Hansen 2009) је показао да ограничавање диска планетезимала на 1,0 АЈ може да реши проблем малог Марса. С друге стране, једноставним тестом може се показати да ако је Јупитер мигрирао до 1,5 АЈ, пре него је променио смер миграције, унутрашњи диск

планетезимала био би одсечен управо на 1,0 AJ. Чињеница да би на тај начин били створени идеални почетни услови за формирање управо онаквих унутрашњих планета какве оне и јесу данас у Сунчевом систему, сугерише нам да ако је до ње икада дошло, велика промена правца Јупитера догодила се на око 1,5 AJ. Ипак, такав сценарио подразумева да је Јупитер два пута прешао преко астероидног прстена, па зато неке карактеристике астероида из те области, као и чињеница да сам прстен ових тела постоји, представљају кључне параметре за тестирање модела.

Волш и сарадници (Walsh et al. 2011) представили су модел велике промене правца, и изложили идеју да је Јупитер пришао на само 1,5 AJ од Сунца, а затим се опет удаљио. Како је удаљеност на којој је дошло до нагле промене правца Јупитерове миграције добијена као резултат комбиновања једноставног теста и ранијих симулација формирања унутрашњих планета, у фокусу модела је објашњење судбине астероида у прстену између данашњих орбита Марса и Јупитера. Пошто тачна локација формирања Јупитера није позната, тестиране су различите почетне вредности, мада је номинално коришћена вредност од 3,5 AJ на основу процена локације тзв. *снежне линије* (Ciesla and Cuzzi 2006; Lecar et al. 2006).



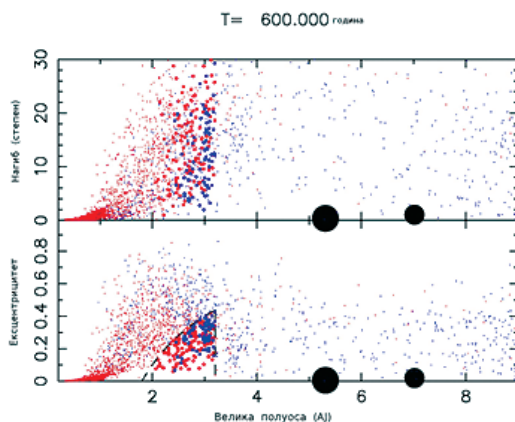
Слика 2. Модел велике промене правца

Симулације почињу са две одвојене популације астероида, као што је приказано на слици 2. Унутар орбита џиновских планета простира се диск планетезимала између 0,7 и 3,0 AJ. Између и изван орбита планета постављена је друга популација астероида коју су вероватно чинили примитивнији објекти, богатији водом. Унутрашња популација је означена као S-тип, а спољашња као C-тип. То међутим не имплицира да постоје само два типа астероида, јер се претпоставља да значајне варијације у саставу постоје унутар сваког од два поменута типа (Bus et al. 2002; DeMeo et al. 2009)

Док Јупитер мигрира према унутра, он расејава око 15% планетезимала из унутрашњег диска (тј. оних S-типа) на нешто веће удаљености, изван 4 АЈ. Након промене правца миграције, Јупитер и Сатурн прво наилазе на ту разбацану популацију S-типа, а тек касније долазе и до популације сачињене од објеката C-типа. Мали део од око 0,5% објеката S-типа „расејан“ је назад на стабилне орбите у област данашњег прстена астероида. Сличан проценат објеката C-типа је касније транспортован у исту област.

Нумеричке симулације су понављане мењајући брзину миграције Јупитера и Сатурна, величине планетезимала, са и без присуства Урана и Нептуна у моделу, почетну локацију Јупитера, као и раст и еволуцију Сатурна (види додатни материјал из Walsh et al. 2011). Варијације ових параметара, иако неизбежно доводе до мањих промена у резултатима, не утичу значајније на општи закључак. Једино промене у миграцији Јупитера суштински могу променити закључак.

Коначни продукт ових симулација је и прстен астероида састављен од планетезимала из обе популације, при чему унутар 2,8 АЈ доминирају објекти S-типа, а изван те границе су већином астероиди C-типа (слика 3). Последњи резултат је последица чињенице да Јупитер и Сатурн приликом напуштања области астероидног прстена, прво наилазе на популацију разбацаних објеката S-типа, а затим на објекте C-типа. Овај редослед игра кључну улогу у добијању поменуте расподеле објеката унутар астероидног прстена, јер тела која су поремећена раније током фазе миграције ка споља, имају већу шансу да заврше у унутрашњем делу прстена од оних транспортованих нешто касније.



Слика 3. Астероидни прстен на крају симулације

Верује се да метеорити типа обичних и угљеничних хондрита потичу од S- односно C-типа астероида, при чему су овде оба типа прилично широко схваћена, тј. обухватају много сродних подгрупа. Ова два општа типа астероида разликује се међусобно по својим петролошким, хемијским и изотопним

карактеристикама, које је тешко објаснити само хлађењем протопланетарног диска (Waggen 2011). Потенцијално објашњење је да су настали у различитим деловима диска, у складу са предвиђањем модела велике промене правца.

Орбитална расподела астероида у прстену након двоструког преласка Јупитера преко те зоне, у одређеној мери разликује се од данашње. Пре свега су ексцентрицитети орбита већи од оних које имају познати астероиди. Треба, међутим, имати у виду да нешто касније долази до нестабилности спољашњих планета (види поглавље о Ница моделу), која може довести до дисперзије орбиталних ексцентрицитета тако да они ипак буду у одређеној сагласности са данашњим (Minton and Malhotra 2009). У смислу орбиталне расподеле, нагиби путањских равни су значајнији показатељ ваљаности модела, пошто су они мање подложни каснијим променама него ексцентрицитети орбита. Код овог параметра кретања сагласност између тренутне ситуације у астероидном прстену и резултата добијеног у моделу је веома добра.

Након завршетка фазе коју описује модел велике промене правца имамо ситуацију да у протопланетарном диску више нема гаса, док су циновске планете ‘паркиране’ у једну компактну конфигурацију у спољашњем Сунчевом систему. Јупитер и Сатурн се налазе на 5,4 односно 7 АЈ, и и даље су у међусобној резонанци. Такође, упркос одређеним непознаницама у погледу њиховог настанка, верује се да су Уран и Нептун такође били у резонаци, како међусобно тако и са Сатурном (Levison et al. 2011). Астероидни прстен је изгубио велики део масе, а орбите преосталих објеката су значајно ексцитоване. Унутрашње планете се још увек формирају, акрецијом преосталих планетезимала и планетарних ембриона из одсеченог диска. Тај процес ће потрајати још неколико десетина милиона година.

НИЦА МОДЕЛ И КАСНО ТЕШКО БОМБАРДОВАЊЕ

Модел велике промене правца нуди одређена решења проблема настанка планета. Поред тога сугерише и веома рано (у првих 4–5 милиона година) пражњење астероидног прстена и ексцитацију орбита објеката у њему. Ипак, тај модел још увек не описује еволуцију нашег планетарног система у његово садашње стање. Наиме, тек нешто касније долази до коначне реконфигурације спољашњих планета која се повезује како се прерасподелом неких планетезимала, тако и са касним тешким бомбардовањем (КТБ). Један други модел, познат под називом Ница модел (Gomes et al. 2005; Morbidelli et al. 2005; Tsiganis et al. 2005; Levison et al. 2011; Bottke et al. 2012), описује догађаје везане за тај период.

Механизам миграције планета у Ница моделу (НМ) је суштински различит од оног у моделу велике промене правца (МВПП). Наиме, док је у МВПП миграција планета последица њихове интеракције са гасним диском, у НМ до миграције долази услед гравитационе интеракције планета са масивним диском планетезимала из Кајперовог појаса. Ова два модела су такође и временски одвојена јер се еволуција коју описује МВПП одвија у првих

5 милиона година, док Ница модел описује еволуцију планета негде између 400 и 600 милиона година од почетка формирања Сунчевог система.

Верује се да је до расејавања циновских планета услед нестабилности дошло у већини вансоларних планетарних система (Ford and Rasio 2008; Juric and Tremaine 2008; Raymond et al. 2010). Сличан механизам је и у основи Ница модела, према којем, након нешто дужег периода стабилности који су спољашње планете провеле у компактној резонантној конфигурацији, размена угаоног момента између планета и масивног примордијалног Кајперовог појаса (30–50 маса Земље) доводи до изласка планета из међусобних резонанци (Levison et al. 2011). То је проузроковало веома бурне и насилне фазе пресецања и расејавања орбита планета услед међусобних блиских прилаза.

Током те фазе Нептун се удаљио од Сунца, доспевши тачно усред области примордијалног Кајперовог појаса, што је довело до масовног и брзог расејавања орбита планетезимала који су се ту налазили. Услед интеракције између планета и планетезимала, тј. међусобне размене угаоног момента, Јупитер је мигрирао мало ближе Сунцу, на своју данашњу удаљеност од око 5,2 АЈ. Преостале три спољашње планете, Сатурн, Уран и Нептун, погуране су даље од Сунца, респективно на 9,5, 19,6 и 30 АЈ, на орбите већих ексцентрицитета и нагиба у односу на раван еклиптике, тј. на своје данашње орбите (Levison et al. 2011). Примордијални Кајперов појас имао је велику улогу у ограничавању повећања ексцентрицитета орбита планета, што је помогло стабилизацији система спољашњих планета. Објекти Кајперовог појаса су том приликом у великој мери динамички ексцитовани, док је сам појас изгубио велики део своје тадашње масе (Levison et al. 2008; Batygin et al. 2011). Данашње карактеристике кретања објеката у том појасу јасно указују на такву прошлост, а један упечатљив пример је орбита Плутона настала као резултат уласка Нептуна у област примордијалног Кајперовог појаса (Malhotra 1995).

Последице догађаја описаних Ница моделом су бројне и видљиве у различитим деловима Сунчевог система. Тако је кратак период током којег је долазило до блиских прилаза између планета и њиховог међусобног расејања, омогућио да циновске планете ‘заробе’ својом гравитацијом један број објеката избачених из Кајперовог појаса. На тај начин су вероватно настали како Јупитерови Тројанци, тако и нерегуларни сателити тих планета (Morbidelli et al. 2005; Nesvorný et al. 2007). Том приликом је и један број објеката Кајперовог појаса транспортован у астероидни појас, за које се верује да су данашња популација астероида D- и P-типа, које налазимо у спољашњим областима прстена астероида (Levison et al. 2009). Такође, значајна померања орбита циновских планета довела су и до померања резонаци у астероидном појасу, што је креирало велике регионе динамичке нестабилности, резултирајући у додатном избацивању објеката из тог појаса, и смањујући његову укупну масу за још 25–50% (Gomes et al. 2005; Minton and Malhotra 2009; Morbidelli et al. 2010). Највећи део објеката који су тада избачени из астероидног појаса завршио је у унутрашњости Сунчевог система, бомбардујући земљолике планете (Bottke et al. 2012). Веза са бомбардовањем објеката унутрашњег Сунчевог система даје веома важну временску повезаност са периодом повећања броја

удара у Земљу, познатим под називом Касно тешко бомбардовање, а за које се верује да се одиграло у периоду пре 4,1 до 3,9 милијарди година (Bottke et al. 2012).

Ница модел описује последњи велики динамички догађај који је обликовао Сунчев систем. У наредних око 4 милијарди година орбите планета нису се мењале, а мања динамичка еволуција уочљива је само код популација малих тела у нашем планетарном систему.

ЗАКЉУЧЦИ И КОМЕНТАРИ

Треба приметити да су модел велике промене правца и Ница модел блиско повезани на неколико начина. Као прво, МВПП обезбеђује почетне услове за Ница модел. Да би Јупитер и Сатурн мигрирали према споља у МВПП, они морају бити веома близу један другоме, тако да се прстенасте празнине у диску настале услед гравитације сваке од планета, делимично чак преклапају (Masset and Snellgrove 2001). У бројним хидро-динамичким симулацијама Јупитер и Сатурн долазе у међусобу резонанцу у средњем кретању 3:2, која доводи до њихове миграције према споља, током које Уран и Нептун такође долазе у резонанцу, формирајући неки вид ланца међусобних резонанци између спољашњих планета (Morbidelli et al. 2007). Оваква конфигурација је стабилна за нешто дужи временски период, и представља полазну тачку Ница модела. Слична компактна резонантна конфигурација пронађена је у многим вансоларним планетским системима које је открила Кеплер мисија (Lissauer et al. 2011).

Друга значајна повезаност између ова два модела односи се на објашњење еволуције астероидног појаса. Наиме, модел велике промене правца предвиђа да је тај појас највећи део своје масе изгубио проласком Јупитера кроз ту зону, али да је и даље имао више масе него што је има данас. Померање резонанци о којем говори Ница модел довело је до даљег губитка масе што заједно доводи до сагласности са масом која је данас присутна у прстену астероида. Што се орбита астероида тиче, оне су током преласка Јупитера у великој мери ексцитоване, што као резултат има добро поклапање нагиба путањских равни са данашњим, али и приметно веће вредности просечног ексцентрицитета. Овде поново ступа на сцену динамичка нестабилност узрокована померањем резонанци у Ница моделу. Она доводи до додатне дисперзије ексцентрицитета орбита астероида, попуњавајући на тај начин недостајућу популацију ниско ексцентричних орбита, док нагибе орбита не мења значајно. Овај низ догађаја и у овом случају доводи до поклапања резултата модела са тренутним стањем у астероидном појасу (Minton and Malhotra 2009; Morbidelli et al. 2010; Walsh et al. 2011).

За крај поменимо да и поред значајних успеха које су оба модела доживела, они ипак имају одређена ограничења. Једно од најзначајнијих потиче свакако од чињенице да процес формирања спољашњих планета није у потпуности јасан, па самим тим ни да ли је брзина њиховог настанка у сагласности

са оном коју нпр. претпоставља модел велике промене правца. У последње време на значају је добила теорија о настанку планета, помоћу које се на елегантнији и једноставнији начин може објаснити нпр. маса планете Марс. Све ово указује да још увек немамо коначан одговор на ова питања, и тек ће будући резултати моћи да потврде поменуте или предложе боље modele.

ЛИТЕРАТУРА

- Amelin Y., Krot A. N., Hutcheon I. D., and Ulyanov A. A. 2002. Lead isotopic ages of chondrules and calcium–aluminum-rich inclusions. *Science* 297:1678–1683.
- Armitage P. J. 2007. Massive planet migration: Theoretical predictions and comparison with observations. *The Astrophysical Journal* 665:1381–1390.
- Batygin K., Brown M. E., and Fraser W. C. 2011. Retention of a primordial cold classical Kuiper Belt in an instability-driven model of solar system formation. *The Astrophysical Journal* 738:13.
- Bottke W. F., Vokrouhlický D., Minton D., Nesvorný D., Morbidelli A., Brasser R., Simonson B., and Levison H. F. 2012. An Archean heavy bombardment from a destabilized extension of the asteroid belt. *Nature* 485:78–81.
- Bouvier A. and Wadhwa M. 2010. The age of the solar system redefined by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic inclusion. *Nature Geoscience* 3:637–641.
- Burbine T. H., McCoy T. J., Meibom A., Gladman B., and Keil K., 2002. Meteoritic parent bodies: Their number and identification. In *Asteroids III*, edited by Bottke W. F., Cellino A., Paolicchi P., and Binzel R. P. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press. pp. 653–667.
- Bus S., Vilas F., and Barucci M. A. 2002. Visible-wavelength spectroscopy of asteroids. In *Asteroids III*, edited by Bottke W. F., Cellino A., Paolicchi P., and Binzel R. P. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press. pp. 169–182.
- Chapman C. R., Cohen B. A., and Grinspoon D. H. 2007. What are the real constraints on the existence and magnitude of the Late Heavy Bombardment? *Icarus* 189:233–245.
- Ciesla F. J. and Cuzzi J. N. 2006. The evolution of the water distribution in a viscous protoplanetary disk. *Icarus* 181:178–204.
- Crida A. and Morbidelli A. 2007. Cavity opening by a giant planet in a protoplanetary disc and effects on planetary migration. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 377:1324–1336.
- DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., and Bus S. J. 2009. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus* 202:160–180.
- Ford E. B. and Rasio F. A. 2008. Origins of eccentric extrasolar planets: Testing the planet–planet scattering model. *The Astrophysical Journal* 686:621–636.
- Gomes R., Levison H. F., Tsiganis K., and Morbidelli A. 2005. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature* 435:466–469.
- Hansen B. M. S. 2009. Formation of the terrestrial planets from a narrow annulus. *The Astrophysical Journal* 703:1131–1140.
- Ida S. and Makino J. 1993. Scattering of planetesimals by a protoplanet—Slowing down of runaway growth. *Icarus* 106:210.
- Juric M. and Tremaine S. 2008. Dynamical origin of extrasolar planet eccentricity distribution. *The Astrophysical Journal* 686:603–620.

- Kenyon S. J. and Bromley B. C. 2006. Terrestrial planet formation. I. The transition from oligarchic growth to chaotic growth. *The Astronomical Journal* 131:1837–1850.
- Kita N. T., Huss G. R., Tachibana S., Amelin Y., Nyquist L. E., and Hutcheon I. D. 2005. Constraints on the origin of chondrules and CAIs from short-lived and long-lived radionuclides. in *Chondrites and the protoplanetary disk*, edited by Krot A. N., Scott E. R. D., and Reipurth B. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 341. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific. pp. 558–587.
- Kleine T., Touboul M., Bourbon B., Nimmo F., Mezger K., Palme H., Jacobsen S. B., Yin Q.-Z., and Halliday A. N. 2009. Hf-W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73:5150–5188.
- Kley W. and Nelson R. P. 2012. Planet-disk interaction and orbital evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 50:211–249.
- Kokubo E. and Ida S. 1998. Oligarchic growth of protoplanets. *Icarus* 131:171–178.
- Kokubo E. and Ida S. 2000. Formation of protoplanets from planetesimals in the solar nebula. *Icarus* 143:15–27.
- Lecar M., Podolak M., Sasselov D., and Chiang E. 2006. On the location of the snow line in a protoplanetary disk. *The Astrophysical Journal* 640:1115–1118.
- Levison H. F., Morbidelli A., Vanlaerhoven C., Gomes R., and Tsiganis K. 2008. Origin of the structure of the Kuiper Belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. *Icarus* 196:258–273.
- Levison H. F., Bottke W. F., Gounelle M., Morbidelli A., Nesvorný D., and Tsiganis K. 2009. Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects. *Nature* 460:364–366.
- Levison H. F., Morbidelli A., Tsiganis K., Nesvorný D., and Gomes R. 2011. Late orbital instabilities in the outer planets induced by interaction with a self-gravitating planetesimal disk. *The Astronomical Journal* 142:152.
- Levison, H. F., Kretke, K. A., Walsh, K. J., Bottke, W. F. 2015. Growing the terrestrial planets from the gradual accumulation of sub-meter sized objects. *Proceedings of the National Academy of Science* 112:14180–14185.
- Lin D. N. C. and Papaloizou J. 1986. On the tidal interaction between protoplanets and the protoplanetary disk. III - Orbital migration of protoplanets. *The Astrophysical Journal* 309:846–857.
- Lissauer J. J., Ragozzine D., Fabrycky D. C., Steffen J. H., Ford E. B., Jenkins J. M., Shporer A., Holman M. J., Rowe J. F., Quintana E. V., Batalha N. M., Borucki W. J., Bryson S. T., Caldwell D. A., Carter J. A., Ciardi D., Dunham E. W., Fortney J. J., Gautier III T. W., Howell S., Koch D. G., Latham D. W., Marcy G. W., Morehead R. C., and Sasselov D. 2011. Architecture and dynamics of Kepler’s candidate multiple transiting planet systems. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 197:8.
- Malhotra R. 1995. The origin of Pluto’s orbit: Implications for the solar system beyond Neptune. *Astrophysical Journal* 110:420–429.
- Masset F. and Snellgrove M. 2001. Reversing type II migration: Resonance trapping of a lighter giant protoplanet. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 320:L55–L59.
- Milani, A., Cellino, A., Knežević, Z., Novaković, B., Spoto, F., Paolicchi, P. 2014. Asteroid families classification: Exploiting very large datasets. *Icarus* 239:46–73.
- Minton D. A. and Malhotra R. 2009. A record of planet migration in the main asteroid belt. *Nature* 457:1109–1111.
- Morbidelli A., Levison H. F., Tsiganis K., and Gomes R. 2005. Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early solar system. *Nature* 435:462–465.

- Morbidelli A., Tsiganis K., Crida A., Levison H. F., and Gomes R. 2007. Dynamics of the giant planets of the solar system in the gaseous protoplanetary disk and their relationship to the current orbital architecture. *The Astronomical Journal* 134:1790–1798.
- Morbidelli A., Brasser R., Tsiganis K., Gomes R., and Levison H. F. 2009. Constructing the secular architecture of the solar system: I. The giant planets. *Astronomy & Astrophysics* 507:1041–1052.
- Morbidelli A., Brasser R., Gomes R., Levison H. F., and Tsiganis K. 2010. Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit. *The Astronomical Journal* 140:1391–1401.
- Morbidelli A., Lunine J. I., O'Brien D. P., Raymond S. N., and Walsh K. J. 2012. Building terrestrial planets. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science* 40:251–275.
- Morishima R., Schmidt M. W., Stadel J., and Moore B. 2008. Formation and accretion history of terrestrial planets from runaway growth through to late time: Implications for orbital eccentricity. *The Astrophysical Journal* 685:1247–1261.
- Morishima R., Stadel J., and Moore B. 2010. From planetesimals to terrestrial planets: N-body simulations 1947 including the effects of nebular gas and giant planets. *Icarus* 207:517–535.
- Nesvorný D., Vokrouhlický D., and Morbidelli A. 2007. Capture of irregular satellites during planetary encounters. *The Astronomical Journal* 133:1962–1976.
- Novaković, B., Maurel, C., Tsirvoulis, G., Knežević, Z. 2015. Asteroid Secular Dynamics: Ceres' Fingerprint Identified. *The Astrophysical Journal* 807, L5.
- O'Brien D. P., Morbidelli A., and Levison H. F. 2006. Terrestrial planet formation with strong dynamical friction. *Icarus* 184:39–58.
- Pierens A. and Raymond S. N. 2011. Two phase, inward-then- outward migration of Jupiter and Saturn in the gaseous solar nebula. *Astronomy & Astrophysics* 533:A131.
- Rafikov R. R. 2003. The growth of planetary embryos: Orderly, runaway, or oligarchic? *The Astronomical Journal* 125:942–961.
- Raymond S. N., O'Brien D. P., Morbidelli A., and Kaib N. A. 2009. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner solar system. *Icarus* 203:644–662.
- Raymond S. N., Armitage P. J., and Gorelick N. 2010. Planet–planet scattering in planetesimal disks. II. Predictions for outer extrasolar planetary systems. *The Astrophysical Journal* 711:772–795.
- Spoto, F., Milani, A., Knežević, Z. 2015. Asteroid family ages. *Icarus* 257:275–289.
- Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A., and Levison H. 2005. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. *Nature* 435:459–461.
- Walsh K. J., Morbidelli A., Raymond S. N., O'Brien D. P., and Mandell A. M. 2011. Sculpting of the inner solar system by gas-driven orbital migration of Jupiter. *Nature* 475:206–209.
- Warren P. H. 2011. Stable-isotopic anomalies and the accretionary assemblage of the Earth and Mars: A subordinate role for carbonaceous chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* 311:93–100.
- Weidenschilling S. J., Spaute D., Davis D. R., Marzari F., and Ohtsuki K. 1997. Accretional evolution of a planetesimal swarm. *Icarus* 128:429–455.
- Wetherill G. W. 1978. Accumulation of the terrestrial planets. In *Protostars and planets*. Tucson, Arizona: University of Arizona Press. pp. 565–598.
- Zappala, V., Cellino, A., Farinella, P., Knežević, Z. 1990. Asteroid families. I - Identification by hierarchical clustering and reliability assessment. *The Astronomical Journal* 100:2030–2046.

Bojan Novaković

IN OUR NEIGHBORHOOD: SMALL SOLAR SYSTEM BODIES

S u m m a r y

Solar system has not always been like it is today. Since its origin, some 4.6 billions of years ago, it has continuously been passing through various phases and forms of evolution. One particularly interesting aspect of the evolution of our planetary system is certainly the migration of giant planets which took place in two distinct phases, well separated in time. Here the two models are presented describing the two phases of migration, as well as the rôle of the small solar system bodies in testing of these models.